

鋼製砂防堰堤に対するレベルII 荷重モデルの提案

防衛大学校 正会員 ○堀口俊行

1 緒言

近年の局地的な豪雨によって、大規模土石流が発生している。そのため、透過型砂防堰堤に損傷が出てきており、現行設計荷重（以下、レベルI 荷重）を大きく上回るような土石流荷重が生起するようになった。このような背景を通して、新たな設計法として設計荷重を上回る荷重（以下、レベルII 荷重）を設定することが必要である。これは、弾性限界を前提とする許容応力度設計法から弾塑性応答を限界とする限界状態設計法に移行する必要がある<sup>1)</sup>、そのための荷重モデルに対応する妥当な限界状態についての検討が望まれている。

そこで本研究は、レベルII 荷重を土石流被害報告データから得られた推定荷重を提案型モデルとして検討するものである。その後、構造モデルの応答について照査する。

2. レベルI 荷重とレベルII 荷重の設定

2.1 レベルI 荷重の設定

現行設計では、地形調査で得られるデータから便覧<sup>2)</sup>に基づき設計されている。流出土砂量は、流域内の移動可能土砂量と降雨量から求められる計画規模の土石流によって運搬土砂量を比較し、小さい方の値を流出土砂量とする。

$$Q_P = 0.01 \cdot \frac{C_s \cdot V_{dpp}}{C_d} \quad (1)$$

ここで、 $Q_P$ : ピーク流量 (m<sup>3</sup>/s),  $C_s$ : 堆積土砂の容積濃度,  $V_{dpp}$ : 土砂量 (m<sup>3</sup>),  $C_d$ : 土石流濃度である。

ピーク流量は、本来は設置箇所ごとに計画されるものであるが、本研究では文献3)を引用し、ピーク流量と流域面積の回帰式を利用した。

$$Q_{P1} = 30.4 A_B^{0.747} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{P1}$ : レベルI 設計荷重のピーク流量 (m<sup>3</sup>/s),  $A_B$ : 流域面積 (km<sup>2</sup>) である。

次に、土石流流速は次式で表される。

$$U_d = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot D_r^{2/3} \cdot (\sin \theta_s)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $U_d$ : 土石流の流速 (m/s),  $n$ : マニングの粗度係数 (s · m<sup>-1/3</sup>) (設計では  $n=0.1$  を使用),  $D_r$ : 径深 (m),  $\theta_s$ : 溪床勾配 (°) である。

続いて、連続の式より流量は次式で表される。

$$Q = A_d \cdot U_d \quad (4)$$

ここで、 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s),  $A_d$ : 流下断面面積 (m<sup>2</sup>) である。

続いて、流下断面面積  $A_d$  は次式で表される。

$$A_d = D_d \cdot B_{da} \quad (5)$$

ここで、 $B_{da}$ : 流下幅 (m) である。

以上、レベルI 荷重における流速と水深は、式(1)-(5)を連立して求められる。

2.2 レベルII 荷重の設定

ここでは、文献3)の99%予測線を用いてレベルII 荷重の計画流出土砂量およびピーク流量 (m<sup>3</sup>/s) を流域面積から設定することが可能となることを示し、次式で表される。

$$Q_{P2} = 247.0 A_d^{0.701} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{P2}$ : レベルII 設計荷重のピーク流量 (m<sup>3</sup>/s)。

さらに、レベルI 荷重と同様に、レベルII 荷重における流速と水深を求める。さらに、堰堤上部には等分布で土石流流体力が作用し、その下部には堆砂圧荷重が作用することを想定して設計されている。土石流流体力は、次式で表わされる。

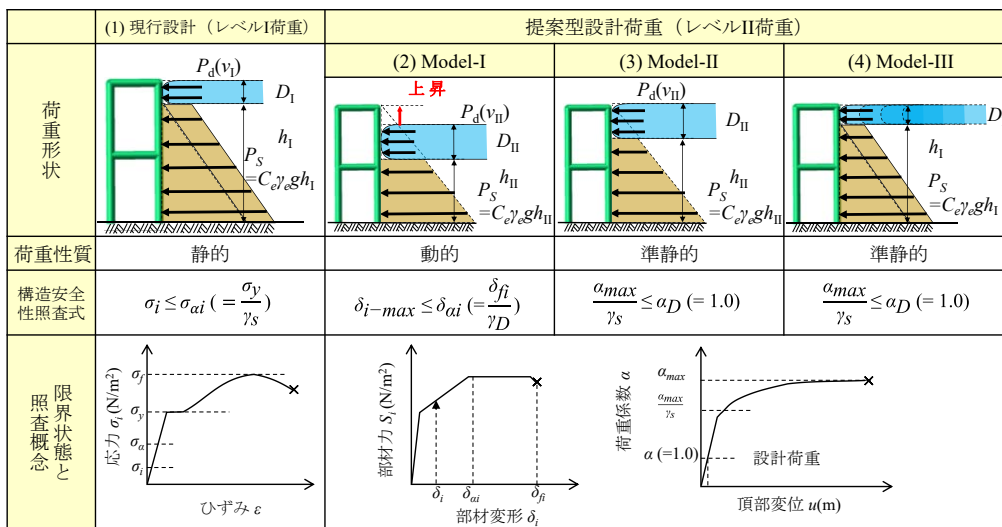
$$F = K_h \cdot \frac{\gamma_d}{g} \cdot D_d \cdot U_d^2 \quad (7)$$

ここで、 $F$ : 土石流流体力 (kN/m),  $K_h$ : 土石流流体力の係数 (1.0),  $\gamma_d$ : 土石流の単位体積重量 (15.8 kN/m<sup>3</sup>),  $g$ : 重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>) である。

次に、堆砂圧荷重は堰堤高さに対して土石流水深以下に作用するものとし、次式で表される。

$$P_{eH} = \frac{1}{2} \cdot C_e \cdot \gamma_e \cdot h_e^2 + C_e \cdot \gamma_d \cdot D_d \cdot h_e \quad (8)$$

ここで、 $P_{eH}$ : 堆砂圧荷重 (kN/m),  $C_e$ : 土圧係数 (0.45),  $\gamma_e$ : 土砂の単位体積重量 (15.3 kN/m<sup>3</sup>),  $h_e$ : 堆砂高 (m) である。



凡例：  
 土石流流体力   
 堆砂圧荷重

図-1 荷重および限界状態を組み合わせた提案手法の概要

キーワード 鋼製砂防堰堤, レベルII 荷重, 設計法, 有限要素法  
 連絡先〒239-8686 神奈川県横須賀市走 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL:046-841-3810 e-mail:htoshi@nda.ac.jp

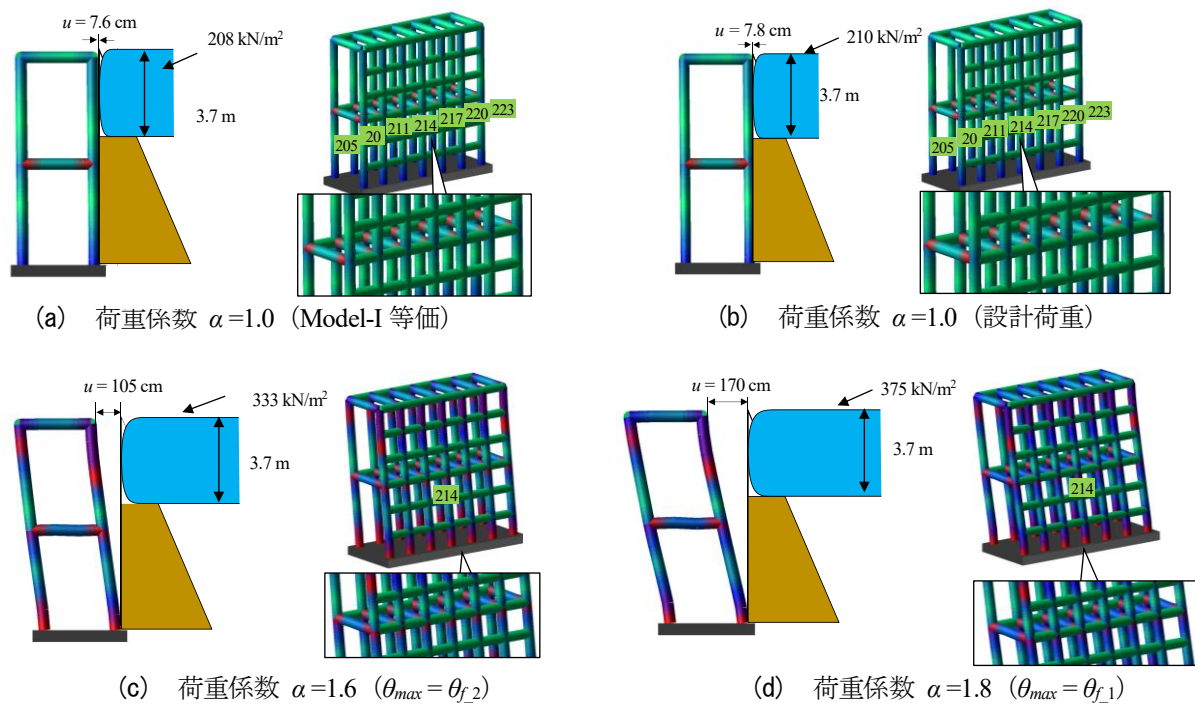


図-2 Model-II ( $A_B = 2.0 \text{ km}^2$ ) における変形応答

### 2.3 Model-I

Model-I の最大荷重に達する時間は、土石流が堰堤頂部に達する時間として、「堰堤の上流側に安息角を形成して、堰堤頂部に達する時間」と定義し、次式で表される。

$$t_H = \frac{0.5H^2}{U_d \cdot D_d \cdot \tan \theta_r} \quad (9)$$

ここで、 $t_H$ : 土石流が堰堤頂部に達する時間 (s)、 $H$ : 堰堤高さ (m)、 $\theta_r$ : 堰堤上流側の堆積土砂の安息角 ( $^\circ$ ) (ここでは、 $\theta_r = 35^\circ$ である。).

### 2.4 Model-II

設計では、土石流荷重を静的荷重として作用させた際の構造応答を照査することが望まれる。そのため、レベル II 荷重のピーク流量から式(4)-(7)を連立して、水深、流速および土石流流体力を求める。

### 2.5 Model-III

Model-III は、レベル I 荷重における土石流水深とレベル II 設計荷重のピーク流量から式(4)-(7)を連立して、流速および土石流流体力を求める。

上記のモデルを総括して図-1 に示すような荷重と限界状態の組み合わせた提案手法となる。

## 3. レベル II 設定における Model-II の検討例

図-2 に示す透過型モデルは、底面が固定されており、高さ 9.0 m、幅 9.5 m、奥行き 3.5 m である。なお、本研究では継手による効果を考慮せず、すべてを同一断面とした。また、各部材間隔は縦材および横材は土石流区間においては最大礫径の 1.0 倍と掲載されているため、想定する最大礫径  $D_{95} = 1.0 \text{ m}$  と同様の間隔で配置している。使用部材は、実際に使用されている鋼管を想定し、直径  $D = 508 \text{ mm}$ 、肉厚  $t = 22 \text{ mm}$  とした。ここで、流域面積の変化に伴って堰堤高など様々な条件下での検討が求められるが、組み合わせの数が多くなるため、レベル II の Model-II の検討例についてのみ報告する。

図-2 に、Model-II ( $A_B = 2.0 \text{ km}^2$ ) における変形応答を示す。図-2(a) に示す荷重係数  $\alpha = 1.0$  の構造応答は、部材 214

の回転角  $\theta_{\max} = 5.9 \times 10^{-3} \text{ rad}$  に達した時であり、この時の堤頂部の水平変位  $u = 7.6 \text{ cm}$  である。図-2(b) に示す荷重係数  $\alpha = 1.0$  の構造応答は設計荷重状態であり、1 段目水平つなぎ材は塑性化している。なお、堤頂部の水平変位  $u = 7.8 \text{ cm}$  である。図-2(c) に示す荷重係数  $\alpha = 1.6$  の構造応答は、部材 214 が回転角  $\theta_{\max} = \theta_{f2}$  に達した時であり、堤体の傾斜が  $7^\circ$  となっている。この時、各接合部付近の部材はすべて塑性化し、堤頂部の水平変位  $u = 105 \text{ cm}$  である。図-2(d) に示す荷重係数  $\alpha = 1.8$  の構造応答は、1 段目水平つなぎ材の回転角が  $\theta_{\max} = \theta_{f1}$  に達した時であり、堤体の傾斜が  $11^\circ$  となっている。この時の堤頂部の水平変位  $u = 170 \text{ cm}$  である。

## 4. 結言

本研究は、レベル II 荷重を静的および動的に作用させた際の構造応答について検討したものである。さらに、構造物の限界状態を部材の限界状態とする手法を提案し、耐荷性能評価の一案を示したものである。今後は、砂防堰堤の設計の観点からレベル II 荷重においても降雨量に関する発生頻度を根拠として、堰堤建設予定地における到達流量と運搬される土砂の流量を求め、流量設定するなどの検討を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 財団法人 砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造物委員会編集：平成 21 年版 鋼製砂防構造物設計便覧，エッセイエブロー，2010
- 2) 嶋丈示，松澤遼，山口望勝，武田一平，石川信隆，水山高久：礫衝突を受ける鋼製透過型砂防堰堤の原稿設計法の問題点と衝撃解析，砂防学会誌，Vol.70, No.1, pp.54-59, 2017
- 3) 石川芳治：流域面積，降雨量，地質が土石流の流出土砂量・ピーク流量に与える影響と確率的手法を用いた流出土砂量・ピーク流量の推定法，砂防学会誌，Vol.73, No.5, pp.15-26, 2021